

doi: 10.3788/gzxb20144304.0423003

基于 Tracepro 的微棱镜反光膜正入射无效光分析

皮钧, 商开

(集美大学 机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 为了提高反光膜的逆反射率, 对正入射时微棱镜反光膜的无效光特性进行了研究. 利用几何光学原理对单个角锥的无效光出射方式进行了分析, 得到了单个角锥无效光的出射特性. 在单个角锥的基础上, 进一步分析了角锥阵列中无效光的传播特性, 发现部分无效光能完成逆反射. 分析了无效光在角锥阵列中的反射机理及无效光反射率随角锥阵列底厚变化的规律, 利用 Tracepro 软件进行了仿真验证, 得到单一无效区逆反射率变化曲线及小阵列逆反射率变化曲线. 仿真结果证明了分析的正确性及底厚对无效光的重要影响, 并给出了合理设计角锥棱镜阵列形状及底厚的建议, 为提高微棱镜逆反射率、合理设计角锥棱镜底厚提供了理论依据.

关键词: 几何光学; 微棱镜阵列; 无效光线; 底厚; 逆反射率

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0423003-6

Normal Incident Invalid Light of Micro Prism Reflective Sheeting Based on Tracepro

PI Jun, SHANG Kai

(School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: In order to improve the retroreflectance of the retroreflective sheeting, the properties of invalid light in micro corner cube prism were studied theoretically. By using the theory of geometrical optics, the outgoing way of invalid light in single cube was analyzed, and the properties of invalid light in single cube corner were given. Based on the single cube, the characteristics of invalid light of cube array were studied, the result that a part of invalid light could turn to effective light was found. The reflection principle, and variation law with the bottom thickness of invalid light which in corner cube array were analyzed. Testing and verifying by the optical software Tracepro, the retroreflection curve of single invalid area and small array were obtained. The analysis and the importance of corner array thickness on invalid light were proved by the simulation results. With practice, suggestions of design corner array were given. The obtained results provide theoretical foundations for improving retroreflection ratio of the micro prisms and reasonable design of micro prisms bottom thickness.

Key words: Geometrical optics; Micro prism array; Invalid light; Bottom thickness; Retroreflectance

OCIS Codes: 230.5480; 230.3990; 040.1240; 120.5700; 080.2740

0 引言

微棱镜反光膜广泛地应用于交通、服装、广告等领域. 它利用了角锥棱镜的逆反射特性. 微立方角锥棱镜是较早应用于微棱镜反光膜的一种结构, 现在也仍在大量使用^[1-4]. 这种结构的尺寸很小, 一般在 100 μm 左

右^[5]. 它能将按不同方向照射到角锥底面的光线沿着反向平行的方向射回光源. 对于角锥棱镜已经有许多文献阐述了相关特性. 比如, 文献[6]提出角锥的简单模型及有效面积的计算方法, 得到立方角锥棱镜的最大逆反射面积是 2/3. 文献[7-8]对于角锥的对称性及逆反射光的反射顺序进行了研究. 文献[9-10]则对角

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51175225)和福建省工业科技重点项目(No. 2013H0031)资助

第一作者: 皮钧(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微细结构设计及加工. Email: pi_jun@163.com

收稿日期: 2013-09-16; 录用日期: 2013-11-19

<http://www.photon.ac.cn>

锥棱镜阵列的入射角、反射率函数等进行了分析. 文献[11]对角锥尺寸在厘米级及以上非紧密排列的角锥阵列反射器的反射光强分布进行了分析. 文献[12]简单分析了角锥棱镜无效光产生的原因. 文献[13-15]分析了角锥棱镜的制造缺陷及影响. 为了提高角锥的反射率或者加工使用性能, 文献[16-18]分析了对于角锥结构的优化及角锥的变异结构.

但是, 对于角锥阵列中无效光的特性以及厚度对反射率的影响还没有相关文献具体阐述. 若要对微棱镜阵列进一步改进、提高反射效率需要分析无效光特性. 本文利用几何光学原理对无效光线轨迹进行了分析, 通过光线追迹软件 Tracepro 仿真验证了正入射时反光阵列底厚对无效光线逆反射的影响.

1 单个角锥的无效光线

1.1 几何模型

单个立方角锥棱镜的外表面由四个三角形组成, 底面是一个正三角形, 侧面是三个互相垂直的等腰三角形. 阵列中, 角锥由连接层连接成一个整体, 连接层的厚度也可以称之为底厚, 如图 1 所示.

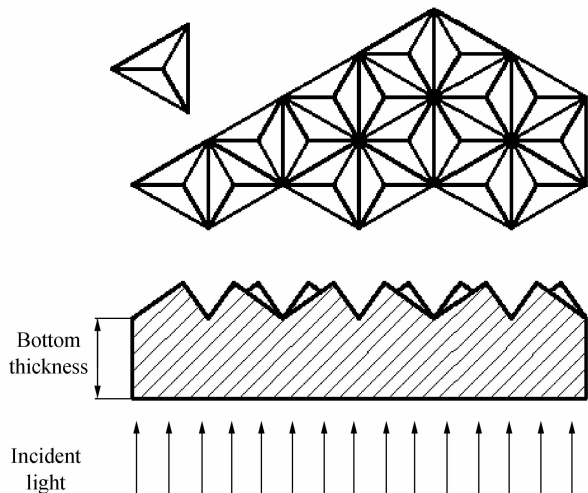


图 1 微立方角锥棱镜阵列
Fig. 1 Micro corner cube prism array

反光膜工作时, 角锥底面是光的入射面和出射面, 角锥侧面是反射面. 反光膜利用了光在透明介质中的全反射定律. 如图 2(a), 角锥的三个侧面区域 $\triangle AOC$ 、 $\triangle COE$ 、 $\triangle EOA$ 分别位于 zOx 面、 xOy 面、 yOz 面. OA 、 OC 、 OE 是角锥的三条侧棱, 取长度为 a . $\triangle ACE$ 所在的平面为角锥底面. 正入射时角锥底面的有效区域是一个正六边形, 占底面的 $2/3$ ^[6], 如图 2(b) 中 $KLMNPQ$. 顶点 O 沿正入射方向在底面的投影为 O' . x 轴、 y 轴、 z 轴沿入射方向在角锥底面的投影为底面三角形的三条中线 CJ 、 EH 、 AI . 三条中线把底面三角形分成 6 个全等区域, 这 6 个区域具有不同的反射顺序^[7-8]. 因为无效区域分别位于这六个区域中, 因此无效区域也可以

分成六个, 如图 2(b) 中的 $a_1 \sim a_6$.

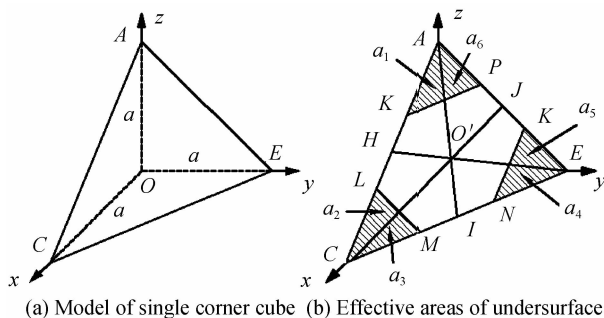


图 2 角锥坐标系及底面有效区域
Fig. 2 Coordinate system and effective areas of corner cube

1.2 假设条件

- 1) 简化反光膜结构模型, 只对角锥阵列进行分析;
- 2) 设定角锥材料为目前常用的聚碳酸酯, 对可见光的折射率为 1.5901, 全反射临界角为 38.96° ;
- 3) 角锥外层为空气, 空气的折射率为 1;
- 4) 角锥没有形状误差;
- 5) 对角锥侧面法向量取朝角锥底面方向为正.

1.3 无效光线的反射区域

正入射时, 光线入射向量为 $\mathbf{A}(-\sqrt{3}/3 \quad -\sqrt{3}/3 \quad -\sqrt{3}/3)$, 角锥底面 ACE 法向量 $(\sqrt{3}/3 \quad \sqrt{3}/3 \quad \sqrt{3}/3)$. 侧面法向量为 $\mathbf{N}_{zox} = (0 \quad 1 \quad 0)$, $\mathbf{N}_{yoy} = (0 \quad 0 \quad 1)$, $\mathbf{N}_{yoz} = (1 \quad 0 \quad 0)$. 由矢量形式的反射定律

$$\mathbf{A}'' = \mathbf{A} - 2\mathbf{N}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{A}) \quad (1)$$

(式中 \mathbf{A}'' 为反射光线矢量, \mathbf{A} 为入射光线矢量, \mathbf{N} 为反射平面单位法向量). 可知, 入射光在侧面反射一次只能改变其方向向量的一个分量符号, 因此若正入射光方向要完全反转需要在三个侧面上各反射一次. 利用投影方法作出无效光线的各次反射区域如图 3(a)、(b)、(c) 所示.

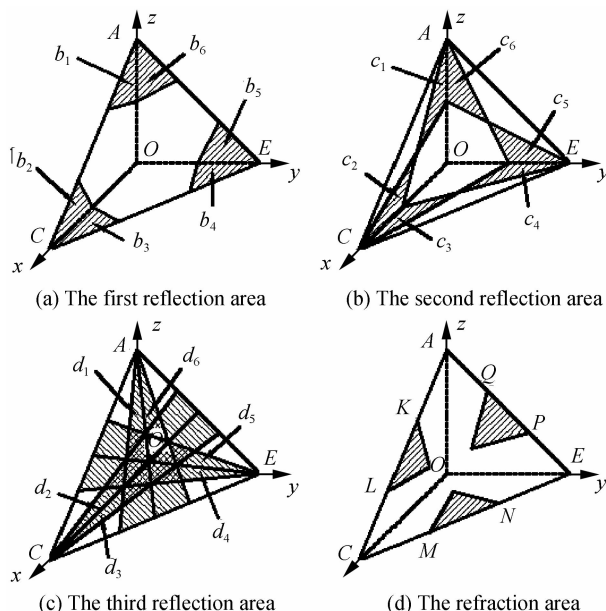


图 3 无效光轨迹
Fig. 3 The trace of invalid light

无效光线的第一、第二次反射区域位于角锥的侧面上,如图 3(a)、(b)中的阴影部分.第三次反射区域位于角锥的底面上,如图 3(c)中阴影部分.因为第三次反射时没有射到侧面上,光线的第三个方向向量没有反转,因此成为无效光.无效光的反射顺序为 $a_1 \rightarrow b_1 \rightarrow c_6 \rightarrow d_6$; $a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_3 \rightarrow d_3$; $a_3 \rightarrow b_3 \rightarrow c_2 \rightarrow d_2$; $a_4 \rightarrow b_4 \rightarrow c_5 \rightarrow d_5$; $a_5 \rightarrow b_5 \rightarrow c_4 \rightarrow d_4$; $a_6 \rightarrow b_6 \rightarrow c_1 \rightarrow d_1$.

在第二次反射后,无效光有三种入射方向.分别为: a_1 和 a_6 ($\sqrt{3}/3 \ \sqrt{3}/3 \ -\sqrt{3}/3$), a_2 和 a_3 ($-\sqrt{3}/3 \ \sqrt{3}/3 \ \sqrt{3}/3$), a_4 和 a_5 ($\sqrt{3}/3 \ -\sqrt{3}/3 \ \sqrt{3}/3$).在底面反射后向量依次为 ($\sqrt{3}/9 \ \sqrt{3}/9 \ -5\sqrt{3}/9$), ($-5\sqrt{3}/9 \ \sqrt{3}/9 \ \sqrt{3}/9$), ($\sqrt{3}/9 \ -5\sqrt{3}/9 \ \sqrt{3}/9$).第三次反射后, a_1 和 a_6 , a_2 和 a_3 , a_4 和 a_5 的光将分别与角锥侧面 COE 、 EOA 、 AOC 接触.入射角均为 15.793° ,小于全反射临界角.由折射定律求得折射角 i_2 为 25.644° .代入菲涅耳方程

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)} + \frac{\tan^2(i_1 - i_2)}{\tan^2(i_1 + i_2)} \right] \quad (2)$$

式中 R 为光线射到透明介质上的光能反射率, i_1 为入

射角, i_2 为折射角.得 $R = 0.053$.此反射率已非常小,因此可以认为大部分的无效光通过侧面折射出角锥.按照矢量形式的折射定律有

$$\begin{cases} \mathbf{A}' = \mathbf{A} + \mathbf{PN} \\ P = \sqrt{n^2 - n'^2 + n^2 \cos^2 I} - n \cos I \end{cases} \quad (3)$$

式中 n 为入射介质折射率, n' 为折射介质折射率, I 为入射角, \mathbf{A} 为长度为 n 的入射光线矢量, \mathbf{A}' 为长度为 n' 的折射光线矢量.求得不同侧面折射向量为: xOy 面 ($0.306, 0.306, -0.901$), yOz 面 ($-0.901, 0.306, 0.306$), zOx 面 ($0.306, -0.901, 0.306$).无效光与侧面的接触区域如图 3(d)所示.

2 角锥阵列无效光线分析

2.1 角锥阵列坐标系分析

对角锥阵列无效光分析的目的是发现能逆反射的无效光,从而提高反光效率.阵列中的有效光仅在单个角锥内传播,而无效光则涉及到多个角锥.需要采用如图 4(a)所示的坐标系分析.图 4(a)中, O_0 、 A_0 、 C_0 、 E_0 为 xyz 坐标系中对应的 O 、 A 、 C 、 E 点.设 \mathbf{T}_1 为从 xyz

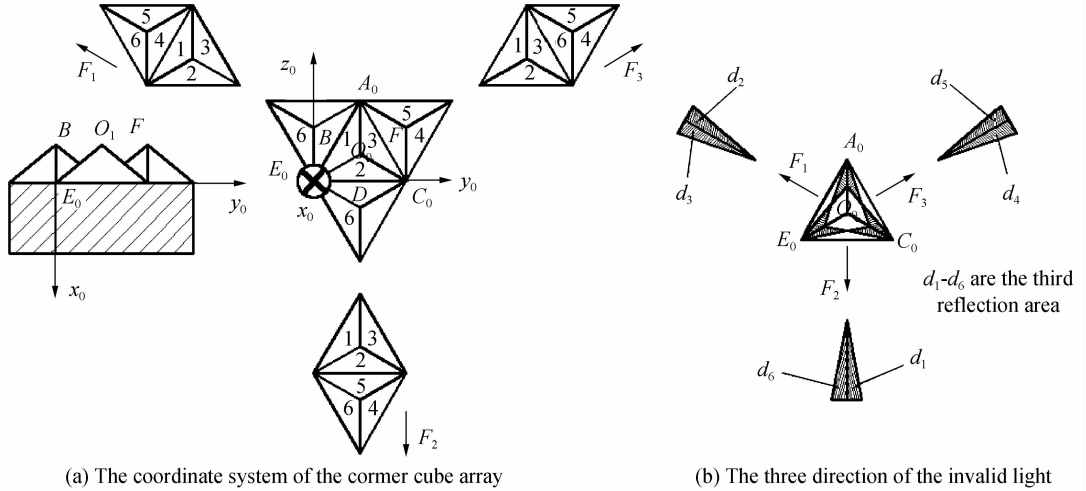


图 4 角锥阵列坐标系及无效光第三次反射方向示意

Fig. 4 Coordinate system of the corner cube array and the third reflection direction of invalid light

坐标系到 $x_0 y_0 z_0$ 坐标系点的坐标转换矩阵, \mathbf{T}_2 为从 xyz 坐标系到 $x_0 y_0 z_0$ 坐标系向量的转换矩阵,则

$$\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & -\sqrt{3}/3 \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 & \sqrt{2}/2 \\ -\sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/6 & \sqrt{6}/3 & \sqrt{6}/6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 \\ -\sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/6 & \sqrt{6}/3 \end{pmatrix}$$

由图 4(a)可知,角锥阵列实际上只有两种不同方向的角锥.在 $z_0 E_0 y_0$ 平面内的三个方向 (F_1 、 F_2 、 F_3) 上,两种不同的角锥周期性排列构成整个阵列.因为每

个角锥具有三个不同侧面,因此整个阵列有 6 种不同的角锥侧面.这六种侧面分别为:侧面 1,对应于侧面 $O_0 A_0 E_0$;侧面 2,对应于侧面 $O_0 E_0 C_0$;侧面 3,对应于侧面 $O_0 C_0 A_0$;侧面 4,对应于侧面 $BE_0 A_0$;侧面 5,对应于侧面 $DC_0 E_0$;侧面 6,对应于侧面 $FA_0 C_0$.法向量分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_1 &= (\sqrt{3}/3 \ \sqrt{2}/2 \ -\sqrt{6}/6); \mathbf{N}_2 = (\sqrt{3}/3 \ 0 \ \sqrt{6}/3); \\ \mathbf{N}_3 &= (\sqrt{3}/3 \ -\sqrt{2}/2 \ -\sqrt{6}/6); \mathbf{N}_4 = (\sqrt{3}/3 \ -\sqrt{2}/2 \ \sqrt{6}/6); \\ \mathbf{N}_5 &= (\sqrt{3}/3 \ 0 \ -\sqrt{6}/3); \mathbf{N}_6 = (\sqrt{3}/3 \ \sqrt{2}/2 \ \sqrt{6}/6). \end{aligned}$$

1、2、3 类和 4、5、6 类侧面分别位于两类角锥上.

2.2 带底层阵列无效光传播规律

无效光不能逆反射的原因是没有完成第三个向量

分量的反转. 若要实现无效光的逆反射, 必须要使它的三个分量符号完全反转. 无效光在第二次反射后, 将射到角锥的底面上. 这时, 它在 $z_0 E_0 y_0$ 平面内将沿三个互成 120° 夹角的方向传播, 如图 4(b) 中的 F_1, F_2, F_3 . 在底面反射时, 只会改变光线在 x_0 方向的符号, 因此第三次反射后, 在 $z_0 E_0 y_0$ 平面内仍保持原来的方向不变. 而 F_i 方向正是角锥周期排列的方向. 若 $x_0 y_0 z_0$ 坐标系统绕 x_0 轴旋转相应角度使 z_0 方向与 F_i 方向重合, 则第三次反射后所有无效光的向量均为 $(-1/3 \ 0 \ 2\sqrt{2}/3)$. 所以, 三个方向上无效光的传播情况完全一致.

以 d_6 区无效光为例进行分析. d_6 区的无效光线来自底面 a_1 区, 在侧面 $O_0 A_0 E_0$ 上第二次反射后沿着方向 F_2 传播, 如图 5. 令发出无效光的角锥为第一个角锥, 接收无效光的角锥为第 m 个角锥. $\Delta A_0' R_0' W_0'$ 为无效光第三次反射区域, $A_0' R_0'$ 的长度为 $\sqrt{6}a/2$. 当底厚改变时, 第三次反射区域的形状不变, 即 $\Delta A_0' R_0' W_0'$ 不变, $A_0 R_0$ 对应的反射区域 $A_0'' R_0''$ 恒位于同一直线上. 因为角度限制, 无效光在底面反射后不能直接和 3、5 类侧面接触. 在底面反射后, 光线可以射到 m 为奇数的棱锥的 2 类侧面上和 m 为偶数的棱锥的 6 类侧面上, 分别如图 5(a) 和图 5(b). 逐渐增大或减小角锥底

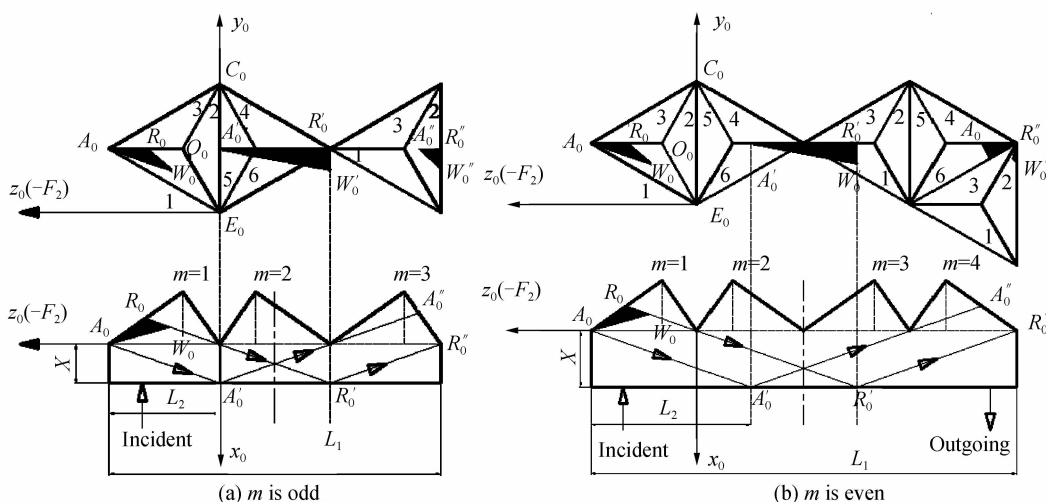


图 5 无效光第三次反射示意图

Fig. 5 The third reflection diagram of the invalid light

厚 X , 两种情况轮流出现, 呈现出周期性. 对应的底厚的周期为 $\sqrt{3}a/4$, 当 $a=100 \mu\text{m}$ 时, 周期为 $43.3 \mu\text{m}$. 在 Tracepro 软件中进行仿真分析, 发现部分光线可以按照以下顺序逆反射:

1) 入射到 2 侧面上后, 小部分无效光能沿底面 $\rightarrow 2$ (折射) $\rightarrow 5$ (折射) \rightarrow 底面 $\rightarrow 2$ (折射) $\rightarrow 5$ (折射) \rightarrow 底面 $\rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow$ 底面 (出射) 的顺序逆反射.

2) 入射到 6 类侧面上后, 一部分无效光能按底面 $\rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow$ 底面 (出射) 的顺序完成逆反射, 其向量沿 $(-1/3 \ 0 \ -2\sqrt{2}/3) \rightarrow (1/3 \ \sqrt{6}/3 \ -\sqrt{2}/3) \rightarrow (1 \ 0 \ 0)$ 顺序变化.

3) 除了以上两种情况, 还有少量的无效光能按照底面 $\rightarrow 6 \rightarrow$ 底面 $\rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow$ 底面 (出射) 或者底面 $\rightarrow 4 \rightarrow$ 底面 $\rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow$ 底面 (出射) 的顺序完成逆反射.

以 $A_0'' R_0''$ 位于 2 类侧面上为原点, 整个的周期可以描述如下: 当 $A_0'' R_0''$ 位于 2 类侧面上时, 小部分无效光线可以按照 1) 顺序逆反射. 当 $A_0'' R_0''$ 逐渐移到 6 类侧面上时, 射到 2 侧面上的光减少, 射到 6 侧面上的光增多. 这时有比较多的光线按照 2) 顺序逆反射. 比如, 当 R_0'' 位于如图 5(b) 中所示 $z_0 E_0 y_0$ 平面上时, 逆反射

率为 44.33%. 当 $A_0'' R_0''$ 从 6 侧面上逐渐移到下一角锥的 2 类侧面上时, 会出现按 3) 顺序逆反射的光.

对于按 1)、2)、3) 顺序逆反射的无效光, 随着 m 的增大, 逆反射光和光源的平行距离都会增大, 而 1) 和 3) 中的无效光, 因为要在底面发生两次以上反射, 增大得更加明显, 且不再随 m 的变化具有周期性. 同时, 因为 1)、3) 顺序逆反射光少, 光程长, 折反射次数多, 对于提高整体逆反射效率意义不大, 所以不进行特别分析. 对于 2) 中的无效光, 因为只在底面反射一次, 具有周期性, 且其逆反射光多, 光程短, 所以需要特别分析.

3 角锥逆反射率随厚度变化的规律

3.1 单个无效区域的逆反射曲线

针对单个无效区域中按 2) 顺序逆反射的光进行分析.

1) 区间划分. 设定 $A_0'' R_0''$ 位于 6 侧面且 R_0'' 位于 $Z_0 E_0 Y_0$ 平面上为原点, 如图 5(b). 原点把一个周期分成两半. 在 $A_0'' R_0''$ 逐渐左移至前一角锥的 2 侧面上的过程中, 投射到 6 侧面上的光会先增加后逐渐减少. 在

A_0R_0 ”逐渐右移至后一角锥的 2 侧面上的过程中,投射到 6 侧面上的光会一直减少. 原点位置对应的 X 值为 $X_0 = (m-1)\sqrt{3}a/8$ (m 为偶数), 取 $a = 100 \mu\text{m}$, $m = 2, 4, 6$, 则 X_0 分别为 21.7、65.0、108.3 μm .

2) 分析方法. 把一个周期分成若干份, 建立不同厚度的角锥阵列模型并导入 Tracepro 软件中进行模拟. 模拟时, 在角锥的底面上方建立和单一无效区域 a_1 形状、位置、大小相同的光源, 光线垂直于底面发射. 在接收角锥的底面上方建立检测器用来检测逆反射光的大小.

3) 分析结果. 当 $m = 2, 4, 6$ 时, 模拟得到的单个无效光线逆反射率随底厚的变化曲线如图 6 曲线 a 所示. 由图可以看出, 按照 2) 顺序逆反射的光具有周期性. 最大逆反射率出现在原点位置左侧. 在底厚属于 56.3 ~ 59.13、13 ~ 15.5、99.6 ~ 102 μm 等区间时, 单个无效光的逆反射率可达到 59%.

3.2 角锥阵列的逆反射曲线

因为无效光能发生逆反射, 且逆反射率随着底厚的变化而变化, 因此角锥阵列整体的逆反射率也会随着底厚发生变化. 对角锥阵列整体的逆反射率分析如下.

1) 分析方法. 将一组包含角锥数目为 96 个, 底面形状为正六边形, 具有不同底厚的角锥阵列导入 Tracerpro 软件中. 在距角锥阵列较远处建立和角锥阵列形状一样的光源, 光源发出的光垂直向阵列底面照射, 在光源背离角锥一侧建立一个大小、形状与光源相同的检测器用来检测逆反射光的大小.

2) 分析结果. 与单个无效区域厚度对应的角锥阵列的逆反射率变化曲线如图 6 曲线 b 所示. 由图可以看出, 阵列的逆反射率大体上跟随无效光逆反射率的变化而变化. 因为还存在按 2.2 节中 1)、3) 顺序逆反射的无效光. 一个周期中, 阵列的逆反射率曲线的波峰、波谷与单个无效光逆反射率曲线的波峰、波谷位置略有

偏差. 过了原点之后, 增加了一部分按照 2.2 节中 3) 顺序逆反射的无效光. 因此在曲线 b 上原点对应的位置右侧有一个小波峰, 如图 6 中的 h 点. 随着 m 的增大, 上述偏差会减小.

3.3 合理设计角锥阵列的建议

对含有限个角锥的阵列, 可以从以下几个方面考虑提高角锥的配对率:

1) 阵列最适合的形状是正六边形. 因为在 $z_0 E_0 y_0$ 平面中, 无效光分成互成 120° 的 3 个方向, 正六边形排列形状与此种情况刚好对应.

2) 角锥阵列的厚度不宜过大, 因为厚度越大, m 越大. 这会使发射角锥和接收角锥间距离过大, 从而使无效光无法逆反射.

3) 阵列包含的角锥数目越多, 角锥的配对率越高, 能增大整体的逆反射率.

4 结论

利用几何光学原理及软件仿真方法对单个角锥及角锥阵列中的无效光特性进行了分析. 结果表明: 1) 单个角锥及角锥阵列中的正入射无效光传播方式存在明显区别, 单个角锥中的无效光将分别从三个侧面射出, 而角锥阵列中的无效光因为受到具有厚度的底面反射而变得复杂, 且在合适条件下可以沿着与入射方向反向平行的方向射回. 2) 角锥中的侧面可以分成 6 种, 且阵列中无效光出射的三个方向与角锥阵列排列方向对应. 3) 随着底厚的变化, 单一区域的无效光分别射到序号为奇数或偶数的接收角锥上, 从而呈现周期性. 4) 软件仿真结果证明了分析的正确性, 在角锥阵列的底厚选择合适时, 无效光能较大地逆反射, 若能合理设计角锥底厚及小阵列的形状及数目, 反光膜的逆反射率能得到提高.

参考文献

- [1] Rowland Development Corporation. Retroreflective material: US, 3684348[P]. 1972-08-15.
 - [2] Minnesota Mining and Manufacturing Company. High efficiency cube corner retroreflective material: US, 4938563[P]. 1990-07-03.
 - [3] 3M Innovative Properties Company. Cube corner geometric structures in a substrate formed by both replicating and machining processes: US, 6413615 B2[P]. 2002-07-02.
 - [4] 刘建军. 道路交通安全与逆反射技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 45-49.
 - [5] BRINKSMIEIER E, GLÄBE R, FLUCKE C. Manufacturing of molds for replication of microcube corner retroreflectors[J]. *Production Engineering-Research and Development*, 2008, 2(1): 33-38.
 - [6] ECKHARDT H D. Simple model of corner reflector phenomena[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(7): 1559-1566.
 - [7] LI Zhen, ZHENG Jun, WEI Shang-chen, et al. Evaluation of reflective performance of cube corner array retro-reflector[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 16(2): 109-115.
- 李真, 郑筠, 魏尚辰, 等. 角锥棱镜阵列式反射镜反光性能及其

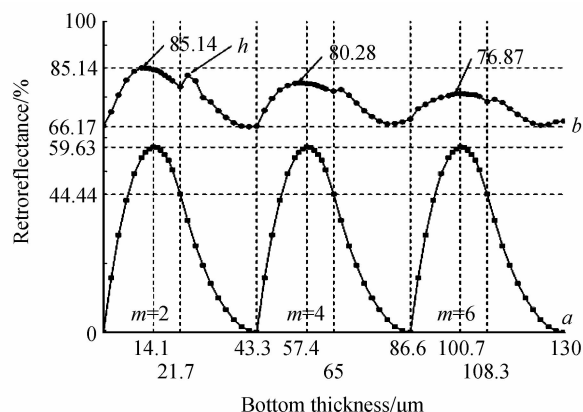


图 6 逆反射率变化曲线

Fig. 6 Variation curve of retroreflectance

- 评价的研究[J]. 计量学报, 1995, **16**(2):109-115.
- [8] O'BRIEN D C, FAULKNER G E, EDWARDS D J. Optical properties of a retroreflecting sheet [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19): 4137-4144.
- [9] YUAN Jing-he, CHEN Bo, ZENG Hong-jun, *et al.* Properties study for the micro-prism array retro-reflector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(11): 1023-1027.
袁景和, 陈波, 曾红军, 等. 微棱镜阵列型定向反射器特性[J]. 光子学报, 1998, **27**(11):1023-1027.
- [10] YUAN Jing-he, CHANG Sheng-jiang, LI Su-mei, *et al.* Design and fabrication of micro-cube-corner array retro-reflectors[J]. *Optics Communications*, 2002, **209**(1-3): 75-83.
- [11] WANG Tao, WANG Wei, DU Peng-fei, *et al.* Calculation of the light intensity distribution reflected by a planar corner-cube retroreflector array with the size of centimeter and above [J]. *Optik*, 2013, **124**(22): 5307-5312.
- [12] CAI Yan-ming, CHEN Gang, CHEN Gao-ting, *et al.* On the effective reflection area of a cubic corner reflector[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(3): 253-257.
蔡燕民, 陈刚, 陈高庭, 等. 立方角锥棱镜的有效反射区[J]. 光学技术, 2000, **26**(3): 253-257.
- [13] KIM H, MIN S W, LEEL B. Geometrical optics analysis of the structural imperfection of retroreflection corner cubes with a nonlinear conjugate gradient method [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(34): 6453-6469.
- [14] JOLIC K I, GHANTASALA M K, HARVEY E C. Excimer laser machining of corner cube structures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, **14**(3): 388-397.
- [15] LOU Yi-min, WANG Hui, LIU Qing-kun, *et al.* Analysis and fabrication of corner cube array based on laser direct writing technology [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(29): 5567-5574.
- [16] KIM H, LEE B. Optimal design of retroreflection corner-cube sheets by geometric optics analysis [J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(9): 094002-094002-14.
- [17] Amerace Corporaiton. Cube-corner reflector with non-aligned cube axes and element axes; US, 3923378[P]. 1975-12-02.
- [18] 3M Innovative Properties Company. Lamina comprising cube corner elements and retro-reflective sheeting; US, 7722197 [P]. 2010-05-25.